

「電子・光子等の機能制御」

平成 11 年度採択研究代表者

覧具 博義

(東京農工大学工学部 教授)

「光・電子波束制御エンジニアリング」

1. 研究実施の概要

本プロジェクトにおいては、光と物質の相互作用をベースにしたいわゆるフォトニクス技術を次世代に向けて飛躍的に発展させることを狙って、フェムト秒領域の超短光パルスの位相を高速かつ高精度に制御し利用する技術の開発を目指している。特に、位相を制御したフェムト秒領域の超短光パルスと、物質中の量子波束、特に半導体ナノ構造中に形成した電子波束、との相互作用を用いて実現することを目標とする

具体的には、まず光パルスの内部位相を自由に制御するフェムト秒位相制御光源を開発する。さらには、量子波束の振幅・位相情報を直接読み出す方法を開発し、物質中に書き込んだ任意の位相情報をどれだけ再現できるかを試みる。このように、フェムト秒パルスの持つ振幅・位相情報を、物質中に生成された量子波束の振幅・位相情報に転写し、またその逆の動作も可能とするデバイスの原理を実証する。これにより、光の運ぶ情報を半導体素子中に一時的に保持する光メモリあるいは光バッファ機能の実現可能性を探索する。さらには、一度物質中に量子波束の形で書き込まれた情報を別の制御パルスによって量子干渉させ、デバイス内で演算する光ゲート機能の可能性も考慮する。

本プロジェクトは、半導体ナノ構造を用いた光・電子波束相互制御の研究をすすめる東京農工大および日本電気(株)、フェムト秒テクノロジー研究機構と、光・分子核波束制御の研究をすすめる東北大から構成される。半導体と分子とは対象は異なるものの、技術的および物理的なアプローチにおいて基本的に共通する点が極めて多い。このように、ナノメートル或いはサブナノメートルの微少領域に局在する量子波束を光で制御する技術の開発は、当初目標の光情報通信をはじめ、物質・材料科学、生命科学といった広範囲の科学技術に質的な変革を促す可能性を秘めている。

2. 研究実施内容

2.1 フェムト秒量子制御グループおよび量子構造材料グループ

(1) 位相制御パルス発生

0.8 μm 帯のフェムト秒パルスを周波数領域で 128 チャンネルに分割し、個別に位相制御し、再合成する位相制御光源を開発した。出力光パルスの位相をモニターし所望の任意の位相プロファイルを付加できるプログラマブル性が特徴であり、パルス内部位相の2次分散、3次分散等を独立

に制御可能である。

今年度は、すでに恒常的に稼働している $0.8\ \mu\text{m}$ 帯光源に加えて、液晶光変調器を用いた位相変調器、周波数分解光ゲート法を用いた位相解析器を組み合わせたフィードバック制御システムを、 $1.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 帯を含む可変波長光源に適用した。

(2) 光位相検出

位相制御光源の開発とならんで、光パルスの内部位相を波長分割かつ時分割で検出する技術も、このプロジェクト研究の重要要素であり、以下の二つの手法を追求した。

(2-1) 相互相関周波数分解光ゲート法を用いた非線形位相変化の測定

デバイスによる位相・強度変化は、試料に照射する前のパルス(参照パルス)の位相・強度と試料照射後のパルス(テストパルス)の位相・強度を比較することで得られる。はじめに、基準となる参照パルスの位相・強度を得るために自己相関法である周波数分解光ゲート法を用いる。テストパルスの解析には、マイケルソン型干渉計の片方の光路に試料を挿入して測定した、参照パルスとテストパルスの相互相関信号を用いる。あらかじめ求めた参照パルス電場を用いて、実験相互相関信号を再構築するテストパルス電場を数値解析により求める。チタンサファイア増幅器からのパルスエネルギー $700\ \mu\text{J}$ @ 1kHz 、パルス幅 60fs のフェムト秒パルス光を用いて、サファイア結晶中の非線形伝搬を調べた。サファイア結晶においてテストパルス自身によって誘起される自己位相変調およびラマン散乱によって影響を受けた後のスペクトル強度と位相解析を行った。その結果、図 1 に示すように、自己位相変調によりスペクトルが広がり、また自己位相変調による位相変化の他に群速度分散が主となる高次分散の影響からパルススペクトルの両端において大きな位相変化が確認された。

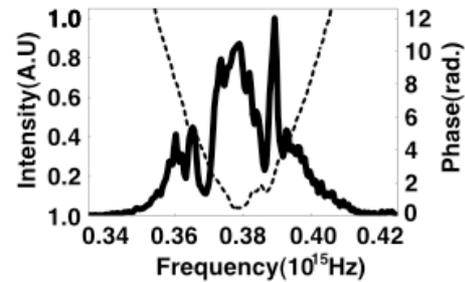


図1 パルススペクトル(黒太線:照射エネルギー45.4J、点線:位相曲線)

(2-2) サニャック干渉計を用いた非線形複素感受率のフェムト秒時間分解干渉測定

本研究では、光路長のゆらぎに対し安定なリング型同一光路干渉計を用いて、試料の励起パルスによる屈折率・吸収変化を、プローブパルスの位相・振幅変化として検出する。今年度は低電力化が求められる超高速デバイスへの適用を視野に入れ、従来の CCD カメラ撮像型を改良したロックイン検出型の干渉測定を行った。位相・振幅変化の分離測定には、ロックインアンプに接続したフォトダイオードを干渉縞の空間軸方向に走査し、測定した非線形干渉縞をフーリエ変換することによ

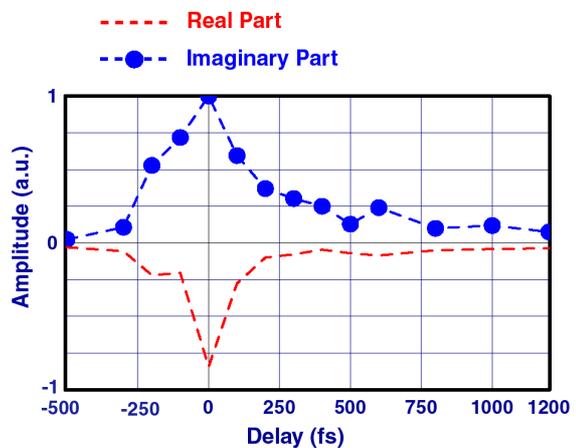


図2 非線形位相・振幅変化の時間分解測定

て行った。チタンサファイアマルチパス増幅器から出力されるパルス幅 50fs、スペクトル 800±45nm、平均出力 800 μJ@1KHz のフェムト秒パルス光を用いた。またこの測定は参照パルス、プローブパルス光として、自己位相変調によるフェムト秒白色光を用いた。透明液体試料 CS₂ を用いて、プローブ波長 720nm における実部振幅、虚部振幅を分離した結果を図 2 に示す。試料が励起された瞬間の遅延時間 0fs で最大の位相変化が起こっている。また位相変化のみならず、0fs 近辺では大きな振幅変化も観測された。これは、相互位相変調によるスペクトル変化の結果であるが、この観測結果は、プローブパルスの非線形位相変化に加えて、振幅変化も同時に分離測定可能である本方法の大きな利点を実証したものである。

(3) 量子波束形成・制御・解析

昨年度に完成させた 0.8 μm 帯フェムト秒位相制御光源をもちいて、媒質中における波束形成と検出をまず有機色素分子をもちいて実証した。分子核波束の生成とその光パルス位相への依存性を、励起に伴う蛍光の発光効率のパルスチャープに対する依存性として検出した。このメカニズムを詳細に理論解析し、この現象の本質が 2+1 ないし 2+2 準位系で実現できることを明らかにした。すなわち、色素よりはるかに単純で設計可能な準位構成を持つ半導体量子井戸などで実現可能という見通しが得られた。

(4) 半導体ナノ構造の光学評価

半導体ナノ構造中に励起した波束を検出・制御することが、このプロジェクトの最も重要な目標である。その実現と評価には、波束の消滅をもたらす半導体中におけるキャリア緩和の情報を得ることも重要である。昨年度開発した時間分解発光分光装置および位相緩和測定装置をもちいて、ターゲットとするナノ構造試料について、室温から 10K 程度までの温度域で測定する技術を確認した。

(5) 半導体ナノ構造の設計・製作

半導体ナノ構造に置いて波束励起を実現するためには、単一量子準位から複数の準位への同時コヒーレント励起が可能でなければならない。今年度は、このために光学遷移選択則を制御した非対称量子井戸の設計を行った。この設計に基づき、GaAs/AlGaAs 系および GaAs/InGaAs 系の量子井戸を作製し、さらにその光学的評価に着手した。

2.2 分子核波束グループ

光による量子波束のコヒーレント制御は、光電場の振動位相に同期させて物質波(量子波束)の波としての位相を操作する技術である。量子波束制御の一手法として、本グループでは、二連の超短光パルスによって、分子核波束の制御と読み出しを行う技術の開発を行っている。本研究で対象とした分子は、超音速ジェット中に生成した極低温の二原子分子(HgAr ヴァン・デル・ワールズ錯体)である。この分子のある特定の電子状態は、100 ナノ秒近くの長時間持続する孤立した量子波束を保持し得ることと、この状態に関する分光学的データが既に揃っているために、実験に対する正確な理論シミュレーションが可能であるという点で、波束制御の技術開発を行うのに極めて適した系である。

本研究で採用した二連光パルスによる波束制御では、最初の光パルスと二番目の光パルスのそれぞれが生成する二つの量子波束の干渉を利用する。この制御法では、二つの光パルス間の遅延時間(相対位相)を高い精度で制御することが重要となる。これまでの成果を要約すると、

- (a) 光パルスが気体中を通過する際に気体の屈折率に依存して光パルスの群速度が変化する原理に基づき、二連光パルス間の相対位相をアト秒領域で制御する位相変調器(APM)を製作した。このAPMにより、中心波長 254nm、時間幅 300fs の光パルス対間の遅延時間(相対位相)を 10 アト秒以下の精度で制御することに成功した。
- (b) APM の出力であるフェムト秒光パルス対を、互いに孤立した HgAr 分子集団(極低温希薄気体)に照射し、各分子内に発生させた二つの核波束(Hg-Ar 伸縮振動波束)の量子干渉の結果を、パルス間の遅延時間の関数として測定した。その結果、強調的な干渉と反強調的な干渉が光パルスの中心周波数(周期 848 アト秒)の半周期毎に繰り返えされるのを観測した。この波束は主として三つの振動固有状態の重ね合わせから成っているが、二連パルスを照射した後に各固有状態の確率分布を測定すると、どの状態の確率分布も 90%を越える変調コントラストで干渉変調を示すのが観測された。このような高いコントラストの量子波束干渉が観測された理由は、光パルス間の相対位相を 10 アト秒以下の精度で制御できたことと、光子場とコヒーレント相互作用している分子集団の純粋状態アンサンブルを切り出して観測することができたためであると解釈される。
- (c) 上の波束干渉実験の結果をシミュレートするための量子波束時間発展の理論計算により、二連光パルス間の遅延時間をアト秒精度で制御することによって分子内に様々の量子波束モードを書き込むこと(encoding)ができると予測され、光パルス間の遅延時間制御による量子演算ゲートの可能性が示唆された。

3. 研究実施体制

フェムト秒量子制御グループ

- ① グループ長 : 覧具博義(東京農工大学、教授)
- ② フェムト秒パルスの位相制御および、量子ドットデバイス中でのフェムト秒波束の制御を実験および理論の両面から研究する。波長時間多重デバイスに必要な量子ドット構造を理論的に確立していく。さらに、光通信システムの応用という視点から、量子構造デバイスの動作検証に必要な条件付けを行なう。

量子構造材料グループ

- ① グループ長 : 西研一(日本電気つくば研究所、主任研究員)
- ② MBE 法により、電子波束制御に最適な結合量子井戸構造を作成に取り組む。

分子核波束グループ

- ① グループ長 : 佐藤幸紀(東北大学多元物質科学研究所、教授)
- ② 量子波束、特に分子核波束を、アト秒の時間精度で間隔を制御したフェムト秒パルスを用いて量子干渉効果の発生と制御の技術を開発する。

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- Roy Lang, “Problems in recent analysis of injected carrier dynamics in semiconductor quantum dots” Appl. Phys. Lett., 79, pp.3912-3913 (2001)
- Kazuhiko Misawa, “Ultrafast exciton dynamics in molecular J-aggregates”, Abstracts of International Workshop on Femtosecond Technology 2001, p.77 (2001).
- Sayako Itoh, Kazuhiko Misawa, and Roy Lang, “Femtosecond Phase and Amplitude Distortion in Dielectric Materials Measured by Cross-Correlation Frequency Resolved Optical Gating”, Abstracts of International Workshop on Femtosecond Technology 2001, p.185 (2001).
- Isao Matsuda, Kazuhiko Misawa, and Roy Lang, “Phase-Programmable Femtosecond Optical Source for Wave Packet Engineering”, Abstracts of International Workshop on Femtosecond Technology 2001, p.186 (2001).
- Tsugumichi Nagana, Kazuhiko Misawa, and Roy Lang, “Time-resolved interferometry of porphyrin J-aggregates using femtosecond Sagnac interferometer”, Abstracts of International Workshop on Femtosecond Technology 2001, p.184 (2001).
- 松田功、三沢和彦、覧具博義, 「電子波束制御を目的としたフェムト秒位相制御光源」, 信学技報 LQE2001-13, vol.101 No.65 (2001)
- 伊藤明子、三沢和彦、覧具博義 「相互相関周波数分解光ゲート法を用いた物質分散の超広帯域同時測定」 信学技報 LQE2001-82, vol.101 No.448 (2001)
- Y. Sato, H. Chiba, M. Nakamura and K. Ohmori, “Double-Pulse Manipulation of Vibrational Wavepackets in HgAr van der Waals Complex”, in Laser Control and Manipulation of Molecules, ed. A. Bandrauk, R. Gordon, and Y. Fujimura, American Chemical Society Book, Chapter 11, p.155 2001.)
- K. Ohmori, M. Nakamura, H. Chiba, K. Amano, M. Okunishi, and Y. Sato, “Development of attosecond optical-phase manipulation for the wave-packet engineering”, J. Photochem. Photobiol., Vol.145, pp.17-21 (2001).
- 大森賢治「アト秒精度の量子波束エンジニアリング」応用物理, vol.71 No.2,pp.195-199, (2002).

(2) 特許出願

国内2件、外国なし